

Exploration électrophysiologique de la dysplasticité intégrative dans le PPPD

Electrophysiological exploration of integrative dysplasticity in PPPD

Pierre-Yves Libois^a
Alain Bauwens^b
Claire Michel^a
Alyssiane Röhl^a
Patrick Kalenga^a
Mathilde Libois^a
Véronique Carlier^a

^aCentre Neurologique de Réadaptation enfants-adultes CNR542, 6110 Montigny-le-Tilleul, Belgique
^bService ORL, CHU UCL Namur, site de Dinant, 5500 Dinant, Belgique

RÉSUMÉ

Le trouble perceptif postural persistant (PPPD) se caractérise par une instabilité chronique et une intolérance aux environnements visuellement complexes, traduisant une dépendance visuelle excessive et un dysfonctionnement de l'intégration multisensorielle. Cet article propose une lecture physiopathologique du PPPD. Des enregistrements EEG/EOG lors de stimulations devant le Panneau Panoramique Stéréoscopique (PPS) ont été réalisés et mettent en évidence l'apparition chez le sujet sain d'un rythme alpha centro-pariétal, marqueur de la bonne harmonie physiologique des mécanismes intégratifs. Chez le patient PPPD, ce rythme n'apparaît pas et suggère une dysplasticité des mécanismes intégratifs. La rééducation par le PPS, centrée sur le mécanisme clé d'un renforcement de la voie visuelle parvocellulaire en inhibant les voies visuelles magnocellulaire et vestibulaire permet la plupart du temps la réapparition de ce rythme alpha centro-pariétal.

© 2026 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés, y compris ceux relatifs à la fouille de textes et de données, à l'entraînement de l'intelligence artificielle et aux technologies similaires.

SUMMARY

Persistent postural perceptual dizziness (PPPD) is characterised by chronic instability and intolerance to visually complex environments, reflecting excessive visual dependence and multisensory integration dysfunction. This paper proposes a pathophysiological interpretation of PPPD. EEG/EOG recordings during stimulations in front of the Panoramic Stereoscopic Panel (PPS) were performed and emphasised the appearance of a centro-parietal alpha rhythm in healthy subject, interpreted as a marker of the harmonious physiology of the integrative mechanisms. For PPPD patients, this rhythm does not appear and suggests a dysplasticity of the integrative mechanisms. The PPS rehabilitation centered on the key-mechanism of a reinforcement of the visual parvocellular pathway by inhibiting the visual magnocellular and vestibular pathways allowed most often the reappearance of this centro-parietal alpha rhythm.

© 2026 Elsevier Masson SAS. All rights are reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies.

MOTS CLÉS

Rythme alpha centro-pariétal
Dysplasticité
Intégration multisensorielle

KEYWORDS

Centro-parietal alpha rhythm
Dysplasticity
Multisensory integration

Auteur correspondant :

P.-Y. Libois,
Centre Neurologique de
Réadaptation enfants-adultes
CNR542, 6110 Montigny-le-Tilleul,
Belgique.
Adresse e-mail :
py.libois@gmail.com

<https://doi.org/10.1016/j.rfo.2026.04.004>

© 2026 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés, y compris ceux relatifs à la fouille de textes et de données, à l'entraînement de l'intelligence artificielle et aux technologies similaires.

INTRODUCTION

Le PPPD constitue aujourd'hui un cadre nosologique central pour décrire un ensemble de symptômes chroniques associant sensations d'instabilité, intolérance aux environnements visuellement complexes et au glissement rétinien. Ce syndrome est superposable, en de nombreux points, à des concepts tels que l'asthénopie vestibulaire décrite par Bauwens [1], le vertige postural phobique proposé par Brandt [2], ou encore à la notion d'hyper-dépendance visuelle et de vertige visuellement induit introduite par Bronstein [3]. Ces différentes appellations, bien qu'issues de contextes historiques et cliniques distincts, convergent vers une même hypothèse : celle d'un dysfonctionnement des mécanismes d'intégration multisensorielle, et plus spécifiquement d'une dépendance excessive au canal visuel dans les tâches d'équilibration. Plus récemment, le terme de « vertige induit par la vision » (*visual induced vertigo*) a été retenu par la Société Bárány comme appellation générique dans la classification internationale des troubles vestibulaires. Malgré cette reconnaissance nosologique, les mécanismes physiopathologiques sous-jacents, ainsi que les raisons expliquant la persistance temporelle de cette dépendance visuelle, demeurent imparfaitement compris.

Le PPPD, trouble fonctionnel d'intégration multisensorielle

Le PPPD débute le plus souvent par un épisode aigu ou subaigu à caractère vertigineux. Dans un nombre non négligeable de cas, les symptômes peuvent se maintenir, voire s'aggraver, notamment lorsque la rééducation vestibulaire initiale est inadaptée. Le tableau clinique est dominé par des sensations persistantes d'instabilité ou de balancement, majorées par la station debout prolongée, parfois même en position assise, par les mouvements de la tête ou du corps, ainsi que par l'exposition à des environnements visuellement riches ou dynamiques. La chronologie d'apparition des symptômes et leur chronicisation orientent vers l'hypothèse d'une dysplasticité intégrative cérébrale [4], caractérisée par une évolution dysfonctionnelle des mécanismes d'intégration sensorielle après une lésion initiale.

En effet, l'absence d'explication organique persistante, qu'elle soit ORL, neurologique ou ophtalmologique, suggère que les plaintes ne relèvent plus d'un déficit sensoriel primaire, mais d'un déséquilibre des processus intégratifs reliant les afférences visuelles, vestibulaires, somesthésiques et végétatives. Dans ce contexte, le PPPD apparaît moins comme une pathologie périphérique que comme un trouble fonctionnel de l'intégration multisensorielle.

Le système visuel occupe une place centrale dans ce mécanisme intégratif

Fonction sensorielle parmi les plus abouties, le système visuel joue un rôle majeur dans les capacités cognitives d'orientation, d'identification, d'anticipation, d'activation et de planification. Bien qu'il puisse fonctionner de manière relativement autonome, son efficacité maximale repose sur une coordination étroite avec les autres systèmes sensoriels, notamment vestibulaire, somesthésique, auditif et végétatif.

Ainsi, les concepts de dépendance visuelle et de PPPD s'inscrivent dans une vision dynamique du système nerveux

central, où la stabilité fonctionnelle résulte d'un équilibre adaptatif entre les différentes afférences sensorielles. Cet équilibre peut être rompu si une plasticité cérébrale inadaptée se construit. Un mécanisme dysfonctionnel du traitement des afférences sensorielles peut alors s'installer de manière durable, entraînant des états de conflit sensoriel susceptibles de s'auto-entretenir et de compromettre durablement l'homéostasie posturale, perceptive et cognitive. Le concept de dysplasticité cérébrale a été proposé [4]. Dans cet article, nous proposons d'explorer les fondements physiopathologiques du PPPD par une étude électrophysiologique.

ENREGISTREMENTS EEG/EOG ET HYPOTHÈSE DE L'ALPHA CENTRO-PARIÉTAL

L'exploration des mécanismes d'intégration multisensorielle nécessite des outils capables d'objectiver les états fonctionnels toniques et phasiques induits par des stimulations contrôlées. Dans cette perspective, l'électroencéphalographie (EEG), couplée à l'électro-oculographie (EOG), constitue un moyen privilégié pour analyser la dynamique des réseaux cortico-sous-corticaux impliqués dans la régulation visuo-vestibulaire et oculomotrice.

Plusieurs travaux ont mis en évidence l'existence d'une interaction inhibitrice réciproque entre les systèmes visuel et vestibulaire, permettant physiologiquement l'extinction rapide des conflits sensoriels transitoires. Brandt et collaborateurs [5] ont notamment décrit l'apparition d'un rythme alpha centro-pariétal, compris entre 8 et 12 Hz, qu'ils interprètent comme la signature électrophysiologique de cette inhibition réciproque. Ce rythme serait le reflet d'un état cortical particulier, dans lequel les afférences visuelles et vestibulaires sont temporairement modulées afin de résoudre un conflit sensoriel visuo-vestibulaire.

- **Dans des conditions physiologiques**, ce mécanisme inhibiteur s'active lors de situations de discordance sensorielle, comme l'illusion de mouvement perçue lorsque l'on observe un train adjacent démarrer alors que le nôtre est immobile. L'activation phasique du flux optique magnocellulaire induit alors une sensation de déplacement, rapidement corrigée par l'absence de concordance vestibulaire. L'inhibition réciproque visuo-vestibulaire permet un retour rapide vers un état tonique intégré, rendant cette illusion fugace chez le sujet sain.

- **À l'inverse, lorsque ce mécanisme est défaillant**, le conflit sensoriel persiste et s'accompagne d'une symptomatologie caractéristique : intolérance au flux optique, instabilité posturale, céphalées, manifestations neurovégétatives. Ce tableau clinique est fréquemment observé dans les états post-lésionnels chroniques, tels que l'asthénopie vestibulaire ou le PPPD, et constitue un argument majeur en faveur d'un trouble durable de l'inhibition réciproque entre les afférences visuelles et vestibulaires.

Dans ce contexte, nous formulons l'hypothèse que **le rythme alpha centro-pariétal représente un marqueur d'une bonne intégration multisensorielle**, traduisant une inhibition corticale harmonieuse des afférences conflictuelles. L'apparition, la stabilité et la modulation de cet alpha constitueraient ainsi des indicateurs objectifs de la qualité du mécanisme intégré.

Intérêt du couplage EEG-EOG

Le couplage de l'EEG à l'EOG permet, par ailleurs, de relier directement l'activité corticale aux comportements oculomoteurs. L'EOG renseigne sur la stabilité de la fixation (voie parvocellulaire), la présence de nystagmus, de clignements ou de mouvements oculaires rapides et lents, tandis que l'EEG permet d'analyser les corrélats corticaux associés à ces phénomènes. Cette approche multimodale est indispensable pour dissocier les effets liés à l'activation vestibulo-oculaire réflexe de ceux relevant d'un contrôle cortical volontaire et intégré. L'utilisation d'analyses temps-fréquence-puissance (abscisses-ordonnées-couleurs, respectivement), notamment transformée par ondelettes, offre un outil particulièrement adapté à l'étude de ces phénomènes dynamiques. Déduite des analyses fréquentielles classiques, l'analyse par ondelettes permet de suivre de façon plus perceptible l'évolution temporelle des rythmes EEG et d'identifier des états transitoires, tels que l'émergence ou la disparition d'un rythme alpha, en lien direct avec les phases de stimulation et d'intégration sensorielle. Dans cette étude, les EEG et EOG ont été enregistrés sur Vitaport-4 de Temec et analysés par le logiciel Deltamed de Natus.

LE PPS : L'OUTIL EXPÉRIMENTAL SÉLECTIONNÉ POUR EXPLORER L'INTÉGRATION MULTISENSORIELLE

Le PPS, concept et réalisation

Le PPS conçu par Bauwens repose sur un principe simple mais exigeant : placer le sujet dans une situation multisensorielle contrôlée, combinant des stimulations vestibulaires et visuelles, afin de solliciter activement les processus d'intégration et d'inhibition nécessaires au maintien d'un état tonique harmonieux.

Le dispositif associe un bercement pendulaire lent sur fauteuil rotatoire (stimulation vestibulaire) à une fixation visuelle soutenue d'une mire placée à distance proche, face à un environnement visuel panoramique stéréoscopique. Cette configuration crée volontairement un contexte multisensoriel

instable, dans lequel coexistent des afférences vestibulaires canalisées, un glissement rétinien périphérique (voie magnocellulaire) et une image fovéale stabilisée (voie parvocellulaire). Le sujet est ainsi confronté à un conflit sensoriel reproductible et répétitif, qu'il doit résoudre activement par le maintien de la fixation et de la fusion visuelle.

Cette dynamique place le patient dans un rôle actif : l'accès à une perception stéréoscopique stable de l'environnement au cours de la stimulation PPS lui donne un feedback immédiat de la qualité de l'intégration sensorielle obtenue. L'émergence de cette perception tridimensionnelle signe l'installation d'un état tonique intégré harmonieux. À l'inverse, la perte de fixation ou de fusion se traduit par la perte de l'effet stéréoscopique, par la réémergence des phénomènes phasiques et du conflit sensoriel, rendant perceptible au sujet la fragilité de l'équilibre intégratif.

Couplage EEG-EOG en conditions de stimulation PPS chez le sujet sain

En conditions de stimulation PPS d'un sujet sain, nous observons à l'EEG que l'activation soutenue de la fixation fovéale et de la fusion visuelle donne rapidement un alpha centro-pariétal stable (Fig. 1), corrélé à une diminution des mouvements oculaires parasites et à une inhibition des réponses réflexes vestibulo-oculaires. À l'inverse, la perte de fixation ou l'augmentation du conflit sensoriel se traduit par une désynchronisation de l'alpha et une réactivation des réponses phasiques. Ainsi, l'enregistrement simultané EEG/EOG constitue non seulement un outil d'investigation des mécanismes physiopathologiques, mais également un instrument de monitoring permettant d'objectiver l'effet du PPS sur l'équilibre intégratif multisensoriel comme illustré aux Fig. 2 et 3.

- En condition PPS, l'EOG (Fig. 3) est stable confirmant la convergence constante des yeux sur la mire lors des 2 répétitions réalisées et l'EEG (Fig. 2(1)) montre un alpha centro-pariétal comme à la Fig. 1 et analogue à celui décrit par Brandt et al.
- En fixation sans balancement (Fig. 2(2)), l'EEG se désynchronise, apparaît des clignements plus abondants (Fig. 3), la situation est décrite par le patient comme inconfortable.

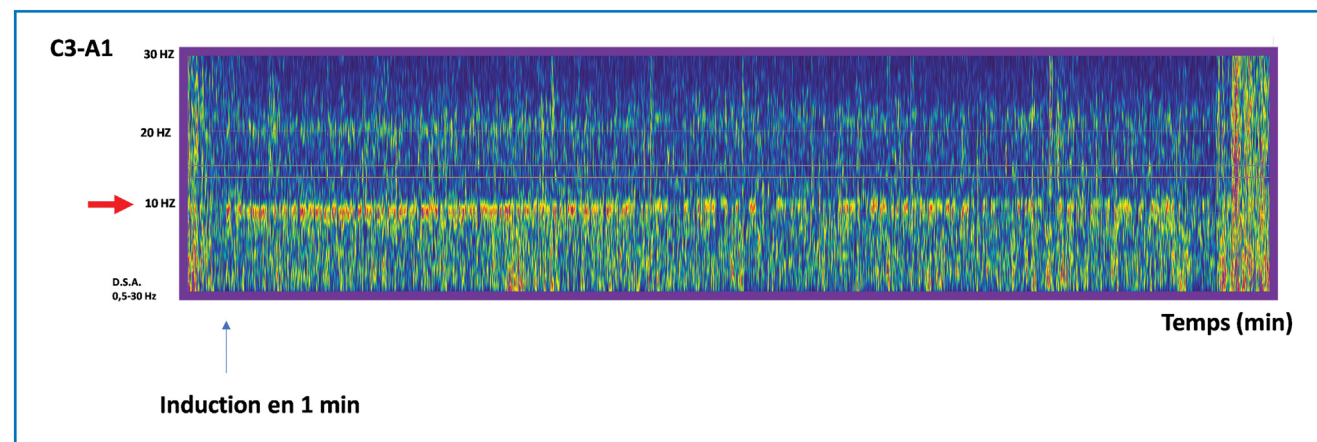


Figure 1. Analyse par ondelettes de l'EEG en centro-pariétal (C3-A1) au cours d'une séance de PPS. On y constate l'apparition, en moins d'une minute, d'une bande alpha (flèche rouge) bien identifiable corrélée à la fusion permanente relatée par le sujet sain.

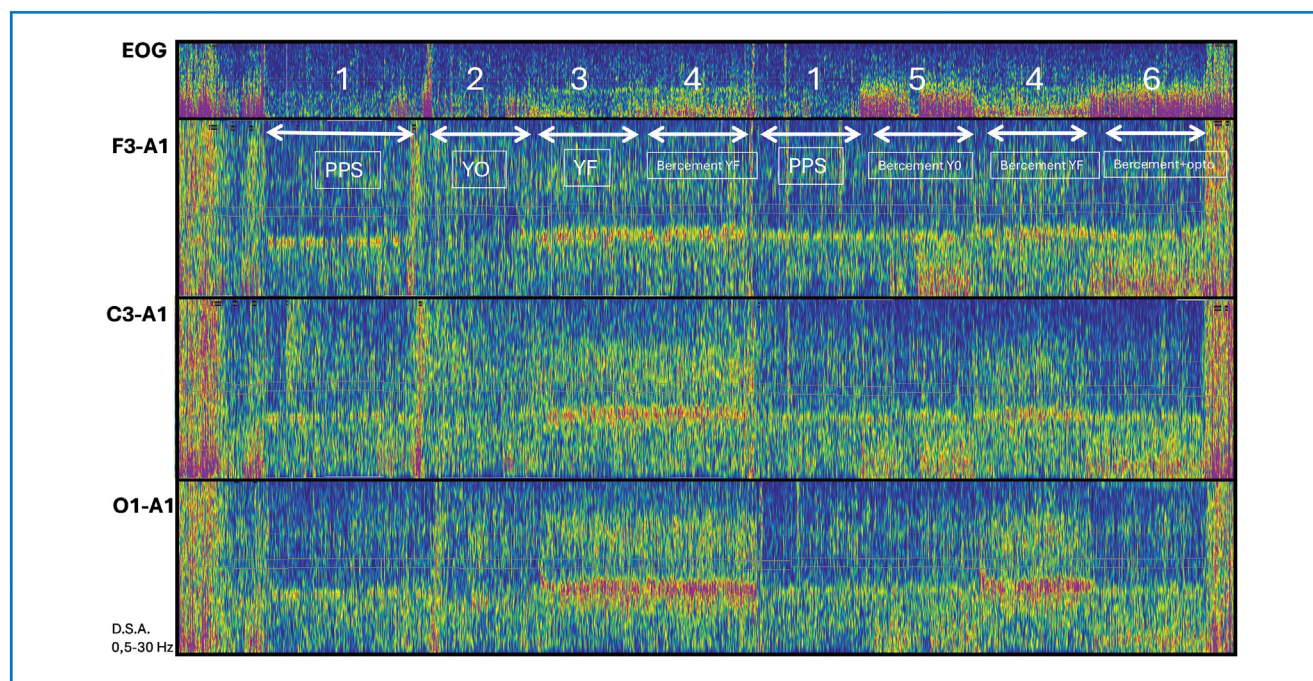


Figure 2. Analyse par ondelettes des signaux EOG et EEG (en F3-A1, C3-A1 et O1-A1) enregistrés pour un sujet sain dans différentes conditions de stimulations : (1) 2 minutes en conditions PPS, (2) 2 minutes yeux ouverts en fixant la mire sans balancement, (3) 2 minutes yeux fermés sans balancement, (4) 2 minutes yeux fermés avec balancement, (5) 2 minutes les yeux ouverts en absence de la mire avec balancement devant le PPS, (6) 2 minutes de balancement devant le PPS avec une stimulation optocinétique verticale associée ; certaines conditions de stimulation sont répétées durant cette séance d'enregistrement.

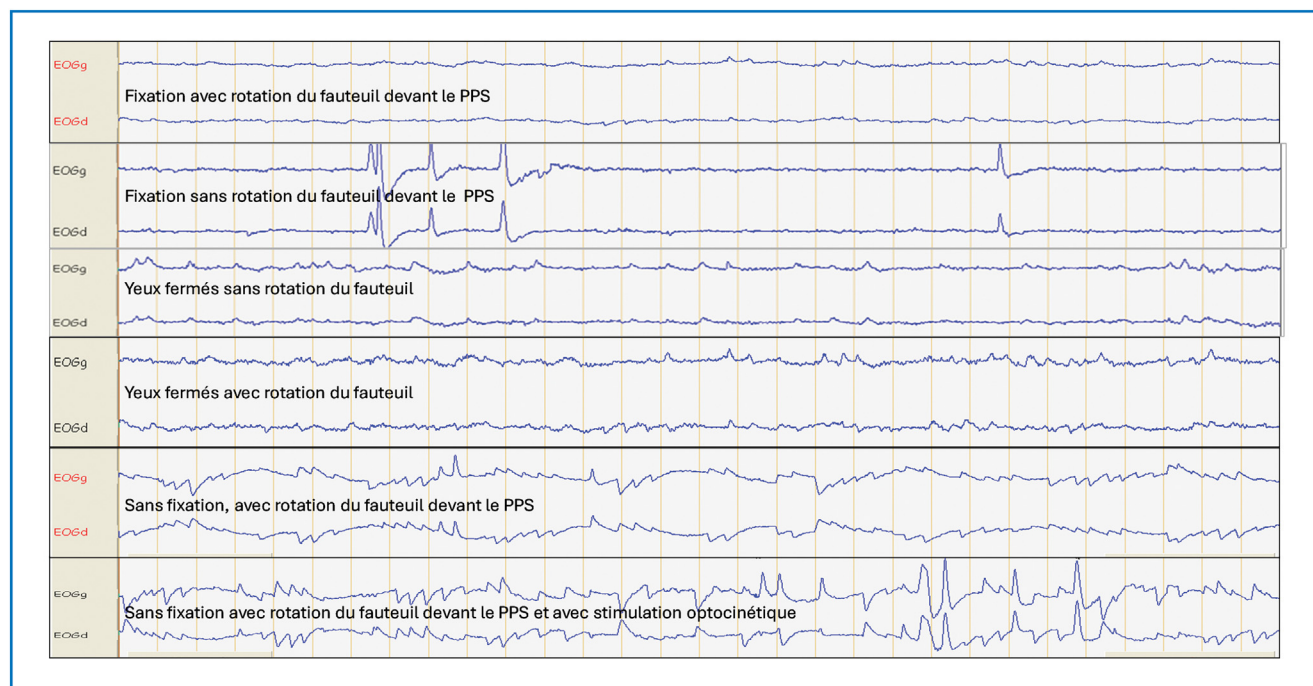


Figure 3. Enregistrements bruts EOG droits et gauches pendant 30 secondes dans ces 6 mêmes conditions de stimulations.

- Les Yeux Fermés sans balancement (*Fig. 2(3)*), apparaît rapidement un alpha postérieur qui diffuse sur tout le cerveau.
- Les yeux fermés avec balancement (*Fig. 2(4)*), l'alpha postérieur est conservé mais des mouvements des yeux lents et rapides de faible amplitude apparaissent à l'EOG (*Fig. 3*) (réflexe vestibulo-oculaire RVO).
- Les yeux ouverts avec balancement mais sans fixation (*Fig. 2(5)*), l'EEG se désynchronise et apparaît à l'EOG un nystagmus (*Fig. 3*) qui augmente avec l'optocinétisme (réflexe optocinétique).

Contrairement à l'alpha occipital observé classiquement lors de la fermeture des yeux, l'alpha enregistré au cours de la stimulation PPS présente une prédominance centro-pariétale, compatible avec l'implication des régions associatives sensorimotrices et pariétales. Cette topographie renforce l'hypothèse d'un alpha lié non pas à une simple désafférentation visuelle comme lorsqu'on ferme les yeux, mais à un processus actif d'intégration multisensorielle et d'inhibition des afférences concurrentes.

Le protocole PPS avec fixation de la mire devant le panneau panoramique stéréoscopique apparaît à l'EEG comme le plus efficace et le plus harmonieux pour exercer l'inhibition des conflits sensoriels visuo-vestibulaires. ***Ceci nous indique que le mécanisme clé dans la modulation du conflit visuo-vestibulaire créé par la stimulation PPS est l'activation de la voie visuelle parvocellulaire grâce à la fixation de la mire. Il en résulte une inhibition des voies visuelle magnocellulaire et vestibulaire.***

Pour les patients présentant un PPPD

L'amélioration clinique observée tendait à être associée à une meilleure capacité à induire et maintenir un alpha centro-pariétal au cours des séances de PPS. Cette corrélation, bien que préliminaire, renforce l'hypothèse selon laquelle le retour à un nouvel état plastique harmonieux constitue un levier central de l'amélioration symptomatique dans le PPPD. Nous suggérons que le PPPD est une dysplasticité liée à une dépendance visuelle magnocellulaire excessive ou à un déficit d'utilisation de la voie visuelle parvocellulaire, dans un contexte vestibulaire initialement instable.

Les patients ne présentant pas d'amélioration clinique notable montraient fréquemment lors de la stimulation PPS, une instabilité persistante ou une absence de l'alpha centro-pariétal ainsi qu'une difficulté à maintenir la fixation visuelle dans les conditions multisensorielles imposées, suggérant un maintien des conflits sensoriels sous-jacents et le maintien de la dysplasticité intégrative.

CONCLUSION

L'utilisation conjointe du Panneau Panoramique Stéréoscopique (PPS) et des enregistrements EEG/EOG permet d'objectiver les mécanismes intégratifs. L'identification d'un rythme alpha centro-pariétal, distinct de l'alpha occipital classique, apparaît comme un marqueur fonctionnel robuste de l'état tonique cortical associé à une inhibition efficace des afférences visuo-vestibulaires conflictuelles.

La rééducation sur fauteuil rotatoire (stimulation vestibulaire) avec fixation de la mire (recrutement de la voie parvocellulaire) devant le panneau PPS (stimulation de la voie magnocellulaire) paraît un outil utile pour moduler la dysplasticité intégrative et pour restaurer un fonctionnement multisensoriel plus harmonieux et durable. Il invite ainsi à dépasser une vision strictement périphérique des troubles vestibulaires chroniques pour envisager des approches centrées sur la plasticité fonctionnelle des réseaux intégratifs du système nerveux central. Au-delà du cadre du PPPD, ce travail ouvre des perspectives plus larges en neurosciences cliniques, en suggérant que le remodelage de la dysplasticité par une nouvelle plasticité plus adaptée grâce à la rééducation pourrait constituer un levier thérapeutique pour diverses pathologies impliquant des troubles de l'intégration sensorielle.

Déclaration de liens d'intérêts

Alain Bauwens déclare un conflit d'intérêt : concepteur du PPS/droits d'auteur.

Les autres auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

RÉFÉRENCES

- [1] Bauwens A, Larock F. Vestibular asthenopia. *J Fr Ophtalmol* 2021;44(10):1560–5. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfo.2021.05.008> [Epub 2021 Sep 20. PMID: 34556339].
- [2] Brandt T. Phobic postural vertigo. *Neurology* 1996;46(6):1515–9. <http://dx.doi.org/10.1212/wnl.46.6.1515> [PMID: 8649539].
- [3] Bronstein AM. The visual vertigo syndrome. *Acta Otolaryngol Suppl* 1995;520(Pt 1):45–8. <http://dx.doi.org/10.3109/00016489509125186> [PMID: 8749077].
- [4] Libois P-Y, Bauwens A, Michel C, Röhl A, Kalenga P, Libois M, et al. La dysplasticité intégrative : un nouveau concept pour comprendre les troubles neurologiques fonctionnels (TNF). *Rev Neurol Suppl* 2026;182:S127–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neurol.2026.02.053>.
- [5] Brandt T, Bartenstein P, Janek A, Dieterich M. Reciprocal inhibitory visual-vestibular interaction. Visual motion stimulation deactivates the parieto-insular vestibular cortex. *Brain* 1998;121(Pt 9):1749–58. <http://dx.doi.org/10.1093/brain/121.9.1749> [PMID: 9762962].